

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



EFEK NITROCARBURIZING PADA MATERIAL LOW CARBON STEEL TERHADAP KETAHANAN KOROSI DAN KEKERASAN

Fajar Al Afghani¹, Erwan Hermawan², Siti Shaleha³

¹Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.20, Tangerang Selatan, Banten 15314

²Direktorat Perumusan Kebijakan Riset, Teknologi, dan Inovasi – BRIN
Gedung B.J. Habibie, Jl. M. H. Thamrin No.8, DKI Jakarta 10340

³Pusat Riset Kecerdasan Artificial dan Keamanan Siber – BRIN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gedung Teknologi 3, Tangerang Selatan, Banten 15314
faja020@brin.go.id

(Naskah diterima: 06–01–2022, Naskah direvisi: 22–01–2022, Naskah disetujui: 01–02–2022)

ABSTRAK

EFEK NITROCARBURIZING PADA MATERIAL LOW CARBON STEEL TERHADAP KETAHANAN KOROSI DAN KEKERASAN. Penggunaan baja saat ini mengalami pertumbuhan yang cukup pesat. Material baja karbon rendah banyak digunakan pada fasilitas di Instalasi Radiometalurgi, BATAN, terutama untuk komponen struktur konveyor, rantai, gerigi dan sebagainya. Penggunaannya yang semakin masif sehingga berbagai macam perkembangan pada material baja dilakukan. Salah satunya adalah dengan meningkatkan kualitas baja agar dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas baja adalah dengan proses nitrokarburasi. Penelitian ini berfokus pada pengaruh proses *nitrocarburizing* terhadap laju korosi. Proses *nitrocarburizing* dilakukan pada beberapa sampel dengan temperatur yang berbeda dan gas yang sama. Peningkatan temperatur pada proses *nitrocarburizing* menghasilkan permukaan spesimen yang lebih keras. Peningkatan kekerasan diperoleh berdasarkan perbedaan temperatur yang meningkat dari 192 HV untuk sampel sebelum di *nitrocarburizing* menjadi 793 HV untuk sampel *nitrocarburizing* 450 °C. Selain itu ketahanan korosi meningkat dengan meningkatnya temperatur *nitrocarburizing*. Proses *nitrocarburizing* menyebabkan difusi atom-atom C dan N sehingga membentuk *compound layer*, *diffusion layer*, dan *transition layer* yang terdiri dari lapisan ϵ -Fe₂₋₃N, γ' -Fe₄N, Fe₂(N, C)₁₋₂ menjadikan lapisan permukaan material menjadi keras dan resistan terhadap korosi.

Kata Kunci: *Nitrocarburizing* , korosi, kekerasan, *low carbon steel*.

ABSTRACT

EFFECT OF NITROCARBURIZING OF LOW CARBON STEEL ON CORROSION RESISTANCE AND HARDNESS. *The use of steel is currently experiencing a fairly rapid growth. Low carbon steel is widely used in radiometallurgical installation, especially for structural components of conveyors, chains, gears and so on. Its use is increasingly massive so that various kinds of developments in steel materials have been carried out. One of them is to improve the quality of steel, so it can be used for a long time. One method that can be used to improve the quality of steel is nitrocarburizing process. This research focused on the effect of the nitrocarburizing process on corrosion rate. The nitrocarburizing process was carried out on several samples with different temperatures but the same gas. Increasing the temperature in the nitrocarburizing process resulted in harder specimen surface. The increase in hardness was obtained based on the temperature difference which increased from 192 HV for the sample before dinitrocarburizing to 793 HV for the 450 °C nitrocarburizing sample. In addition, corrosion resistance increases with increasing nitrocarburizing temperature. The nitrocarburizing process causes the diffusion of C and N atoms to form a compound layer, diffusion layer, and transition layer consisting of a layer of ϵ -Fe₂₋₃N, γ' -Fe₄N, Fe₂(N, C)_{1-z}, making the surface layer of the material become hard and resistant to corrosion.*

Keywords: Nitrocarburizing, corrosion, hardness, low carbon steel.

PENDAHULUAN

Penggunaan baja didunia meningkat secara drastis seiring dengan perkembangan industri otomotif. Berdasarkan laporan OECD, 2021 bahwa permintaan baja akan meningkat 2,7% di tahun 2022 dengan total volume mencapai 1.9 juta mt [1]. Material baja banyak digunakan secara luas di dunia industri karena sifatnya yang kuat, tidak mudah rapuh, tahan terhadap korosi dan keausan [2-4]. Fasilitas Instalasi Radiometalurgi menggunakan bahan *Low carbon steel* pada beberapa component material strukturnya. Konveyor, rantai, gerigi dan lain sebagainya menggunakan *low carbon steel (LCS)* sebagai *base* materialnya. Penggunaannya yang semakin masif banyak memunculkan berbagai pengembangan material baja dengan tujuan meningkatkan kualitas baja, sehingga dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas material baja adalah proses *nitrocarburizing*. Proses ini dapat digunakan untuk melakukan pengerasan permukaan dengan temperatur di bawah 592 °C[4]. Proses yang terjadi adalah difusi atom-atom C dan N sehingga membentuk *compound layer*, *diffusion layer*, dan *transition layer* yang terdiri dari lapisan ϵ -Fe₂₋₃N, γ -Fe₄N, Fe₂(N, C)_{1-z} menjadikan lapisan permukaan material menjadi keras dan resistan terhadap korosi [5]. Guang Chen, dkk telah melakukan penelitian mengenai dampak *nitrocarburizing* terhadap material AISi H13, bahwa efek *nitrocarburizing* dengan menggunakan temperatur yang rendah dapat meningkatkan ketahanan korosi, hal ini dikarenakan adanya fase baru yang terbentuk[6]. Penelitian lain [7,10] dengan menggunakan parameter yang berbeda-beda, yaitu variasi temperatur, bahan, dan gas menghasilkan kemampuan ketahanan korosi yang lebih baik.

Pada penelitian ini dilakukan proses *nitrocarburizing* terhadap material *low carbon steel*. Material ini banyak digunakan di industri nuklir di fasilitas nuklir terutama di BATAN, Indonesia yang menggunakan material ini sebagai bahan pendukung di fasilitas reaktor seperti pipa pendingin sekunder, *cooling tower*, *valve*, sistem perpipaan, dan fasilitas radiometalurgi[11]. Modifikasi permukaan dilakukan untuk mengantisipasi dampak kerusakan material yang ada di dalam *hotcell*. Sebelumnya telah dilakukan penelitian mengenai proses *nitrocarburizing* terhadap

material *low carbon steel* untuk *hotcell* [12,13]. Namun dalam penelitian tersebut tidak membahas mengenai dampaknya terhadap laju korosi. Pada penelitian ini bertujuan untuk melihat dampak proses *nitrocarburizing* terhadap laju korosi, variasi temperatur pada proses *nitrocarburizing* memiliki efek yang berbeda-beda terhadap laju korosi. Dengan adanya modifikasi permukaan ini diharapkan mampu menghasilkan material yang lebih tahan terhadap korosi, sehingga umur pakai material dapat lebih lama.

METODOLOGI

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah dengan komposisi karbon umumnya di bawah 0,3%[14]. Komposisi baja disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi *LCS* yang digunakan sebagai material substrat.

Unsur	Konsentrasi (%)
C	0.298
Si	0.18
Mn	0.568
P	0.009
S	0.013
Cu	0.007
Al	0.002
Cr	0.009
Mo	<0.002
Ni	<0.002
V	<0.002

Baja karbon rendah digunakan untuk fasilitas yang ada di fasilitas radiometalurgi, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, terutama untuk fasilitas hot cell. Contoh baja dimensi dipotong menjadi area 1 X 1 cm² dengan ketebalan 5 mm. Permukaan dipoles secara metalografi dengan menggunakan berbagai tingkat #80, #120, #500, #800, #1200, #2400 dan akhirnya dipoles ke tingkat hingga 3 μ m. Sampel yang telah dipoles, selanjutnya dibersihkan menggunakan sabun dan instrumen ultrasonik sebelum menjalankan proses nitrokarburasi.

Proses *nitrocarburizing* menggunakan mesin nitriding yang dibuat oleh Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA-BATAN) yang telah digunakan untuk beberapa kegiatan penelitian pengerasan permukaan. variabel yang digunakan adalah temperatur

proses *nitrocarburizing*. Parameter yang digunakan dalam penelitian adalah konsentrasi gas yang digunakan yaitu 50% Argon, 10% C₂H₂ dan 40% Nitrogen, Waktu yang digunakan konstan selama 6 jam dan tegangan diatur dari 300 V ke 450 V untuk mendapatkan temperatur yang berbeda yaitu 300°C–450°C. Setelah proses *nitrocarburizing* dilakukan, dilanjutkan dengan evaluasi kekerasan dan karakteristik korosi material LCS sebelum dan sebelum *nitrocarburizing* pada temperatur yang berbeda. Pengujian kekerasan mikro dilakukan dengan menggunakan beban 50 g.

Penentuan karakteristik korosi menggunakan metode elektrokimia dengan beberapa analisis yaitu analisis Open Circuit Potensial (OCP), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Potensiodinamik dan Cyclic Voltametry. Analisis OCP adalah mengukur potensial antara sampel dengan larutan 3,5% NaCl. Pengujian OCP ini berlangsung selama 10 menit. Mekanisme korosi dari substrat LCS dan *coating nitrocarburizing* diinvestigasi dengan uji Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) dengan memberikan potensial AC ±5 mV dengan rentang frekuensi 0,1 hingga 10⁵ Hz. EIS juga digunakan untuk mempelajari karakteristik ketahanan korosi melalui model rangkaian listrik yang equivalent terhadap system material *low carbon steel* di dalam larutan 3,5% NaCl.

Selanjutnya pengujian laju korosi dengan analisis kurva potensiodinamik dimana sampel diberikan tegangan dengan scan rate 5 mV/s, lalu rapat arus diukur. Persamaan untuk menentukan laju korosi dengan kurva potensiodinamik adalah sebagai berikut [15].

$$CR = \frac{i}{n \times F} \quad (1)$$

Dengan CR adalah laju korosi (*corrosion rate*) dengan satuan *mmpy*, *i* adalah kerapatan arus yaitu arus yang mengalir per unit area bahan yang sedang diuji dengan satuan mol/m².s, sedangkan *n* adalah jumlah electron yang terionisasi dari setiap atom logam yang sedang terkorosi, dan *F* adalah tetapan faraday yang nilainya 96500 C/mol.

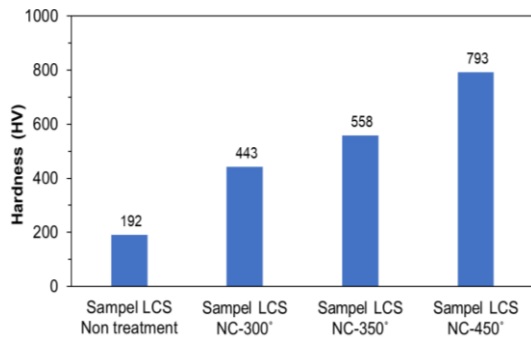
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari penelitian ini diperoleh beberapa hasil pengujian. Tes dilakukan untuk mengetahui karakteristik material setelah dilakukan proses *nitrocarburizing*. Berikut adalah hasil dari pengujian yang telah dilakukan.

a. Hasil Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode Vickers. Gambar 1 adalah kurva hasil uji kekerasan yang menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kekerasan permukaan material. Sampel yang tidak diberi perlakuan adalah LCS yang memiliki nilai kekerasan 192 HV. Setelah proses *nitrocarburizing* dilakukan selama 6 jam pada temperatur 300°C nilai kekerasan meningkat menjadi 443 HV, sedangkan menggunakan temperatur 350°C dan 450°C nilai kekerasan menjadi 558 HV dan 793 HV. Proses yang terjadi adalah difusi atom-atom C dan N sehingga membentuk *compound layer*, *diffusion layer*, dan *transition layer* yang terdiri dari lapisan ε-Fe₂₋₃N, γ'-Fe₄N, Fe₂(N, C)_{1-z} menjadikan lapisan permukaan material menjadi keras dan resistan terhadap korosi[5]. Pada penelitian ini didapatkan nilai kekerasan yang lebih tinggi karena perbedaan temperatur yang digunakan jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya [13]. Pada kondisi temperatur 400–500 °C kekerasan permukaan material lebih optimal jika menggunakan argon. Argon dapat meningkatkan proses disosiasi dan kerapatan ion pada permukaan logam, bahkan penggunaan argon lebih dari 70% dapat semakin meningkatkan laju disosiasi ion yang berdifusi ke permukaan logam [16,17]. Penggunaan nitrogen tanpa berasosiasi dengan gas lain akan sulit mencapai laju disosiasi yang tinggi, karena nitrogen memiliki energi ikat stabil yang cukup tinggi untuk meningkatkan laju disosiasi, gas lain seperti argon atau hidrogen dapat digunakan [4,18]. Peningkatan kekerasan mencapai 131% pada temperatur 450°C. Dibandingkan pada penelitian sebelumnya yang hanya meningkat sebesar 22% dikarenakan hanya sampai temperatur 400°C dalam waktu yang lebih singkat.

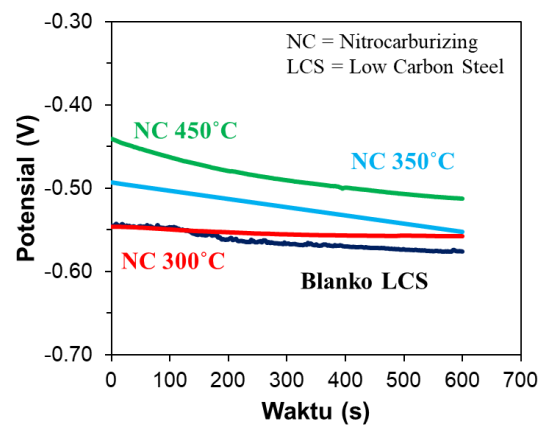
Efek *Nitrocarburizing* Pada Material *Low Carbon Steel* Terhadap Ketahanan Korosi dan Kekerasan
(Fajar Al Afghani, Erwan Hermawan, Siti Shaleha)



Gambar 1. Kurva nilai kekerasan *low carbon steel* blanko dan *coating nitrocarburizing* dengan variasi temperatur

b. Hasil Pengujian *Open Circuit Potensial (OCP)*

Hasil pengukuran *OCP* blanko *LCS* dan *LCS* hasil proses *nitrocarburizing* pada temperatur berbeda ditunjukkan pada Gambar 2. Perlakuan *nitrocarburizing* meningkatkan potensial korosi *LCS* menjadi lebih positif dibanding dengan yang tidak diberikan perlakuan *nitrocarburizing*. Semakin tinggi temperatur pada proses *nitrocarburizing* maka akan semakin meningkatkan nilai *OCP* untuk *LCS*.



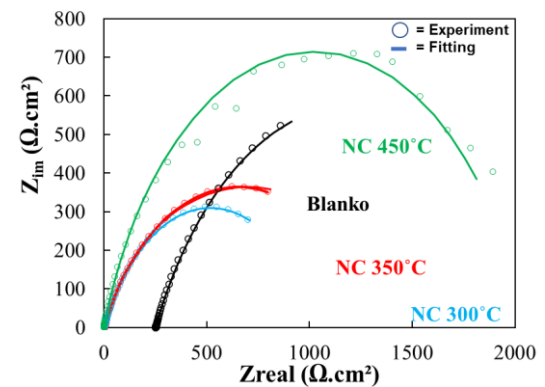
Gambar 2. Kurva *OCP* pada *LCS* setelah proses *nitrocarburizing* pada temperatur berbeda.

Hal tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur pada proses *nitrocarburizing* akan membuat reaksi korosi pada *LCS* terjadi pada potensial lebih tinggi atau dapat dikatakan lebih sulit terjadi korosi. Beberapa penelitian melaporkan hal yang sama bahwa perlakuan korosi menjadikan baja karbon lebih sulit terjadi reaksi korosi [10,18–20]. Hal tersebut disebabkan oleh

lapisan *nitrocarburizing* yang semakin tebal dengan meningkatnya temperatur saat proses *nitrocarburizing*. Lapisan tebal tersebut akan menghambat reaksi korosi antara substrat *LCS* dengan kation [21].

c. Hasil Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*

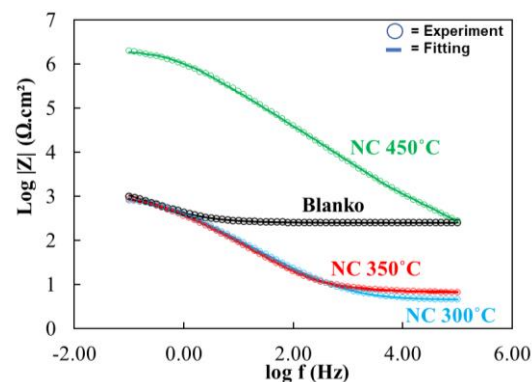
Gambar 3 menunjukkan kurva Nyquist sampel substrat dan terlapis *nitrocarburizing* dengan variasi temperatur. Gambar 3 menunjukkan seluruh sampel menghasilkan loop setengah lingkaran yang menunjukkan fenomena kapasitif. Untuk loop kapasitif dari *coating nitrocarburizing* variasi temperatur memiliki ukuran yang jauh lebih besar dibandingkan substrat dan semakin membesar ketika temperatur *nitrocarburizing* yang diterapkan semakin besar, yang artinya semakin tahan terhadap korosi. Peningkatan ketahanan korosi *LCS* dengan *nitrocarburizing* juga dilaporkan oleh beberapa penelitian [10,18,20,22]. Hal tersebut dikarenakan lapisan Fe_3N mencegah reaksi korosi antara logam substrat *LCS* dengan lingkungannya [13].



Gambar 3. Kurva Nyquist *LCS* blanko dan *coating nitrocarburizing* variasi temperatur

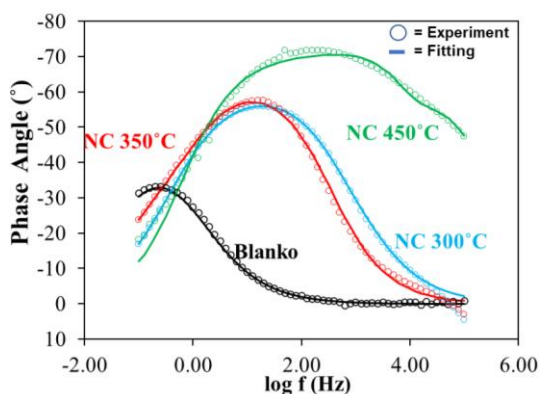
Gambar 4 adalah kurva bode magnitude (penguatan) impedansi yang memberikan info mengenai impedansi total antara real dan imajiner terhadap frekuensi yang diterapkan. Semakin tinggi temperatur *nitrocarburizing* yang diterapkan, semakin tinggi impedansi total yang diperoleh, terutama pada frekuensi rendah ke menengah untuk ketiga variasi temperatur *nitrocarburizing*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa parameter temperatur *nitrocarburizing* mempengaruhi

nilai penguatan resistansi korosi LCS. Temperatur yang tinggi pada proses nitrocarburizing akan meningkatkan laju pertumbuhan lapisan Fe₃N sehingga lapisan yang lebih tebal akan lebih tinggi peningkatan ketahanan korosinya [23].



Gambar 4. Kurva bode magnitude LCS blanko dan nitrocarburizing variasi temperatur.

Gambar 5 adalah kurva bode sudut fasa yang menunjukkan sudut antara data-data pada kurva nyquist dengan sumbu Z_{re} = 0, yang menunjukkan sifat kapasitif/induktif setiap frekuensi, jika berada di antara sudut 0 < θ ≤ -90° maka sifat lapisan pada frekuensi tersebut semakin kapasitif dan jika berada di antara sudut 0 < θ ≤ 90° maka semakin induktif.

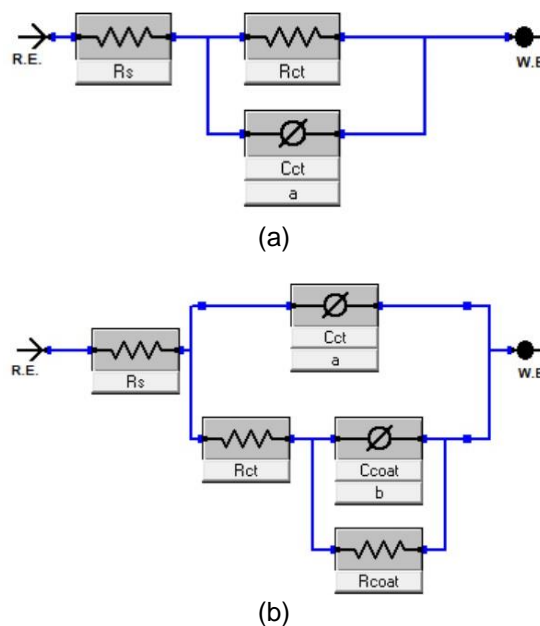


Gambar 5. Kurva bode phase angle LCS blanko dan nitrocarburizing variasi temperatur

Dapat dilihat bahwa pada substrat LCS terdapat puncak di antara sudut 0° hingga 40° pada frekuensi rendah, yang menunjukkan adanya sifat induktif atau peristiwa korosi. Berbeda halnya dengan coating

nitrocarburizing yang memiliki sudut fasa di antara 0° hingga -80° yaitu setiap lapisan bersifat kapasitif terutama pada frekuensi menengah dan terus meningkat ketika temperatur nitrocarburizing yang diterapkan meningkat, artinya mengonfirmasi adanya penebalan lapisan.

Fitting dari ketiga kurva tersebut dimodelkan dengan rangkain RLC yang terdapat pada Gambar 6 (a) untuk substrat LCS dan Gambar 6 (b) untuk nitrocarburizing LCS. Di seluruh sampel terdapat resistansi larutan R_s, C_{ct} dan R_{ct} sebagai kapasitor terdepresi dan resistansi lapisan terluar/outer frekuensi tinggi yang menahan ion-ion larutan korosif berpenetrasi, C_{coat} dan R_{coat} sebagai kapasitor terdepresi dan resistansi lapisan dalam/inner frekuensi rendah yang menahan fenomena transfer muatan antara substrat dan larutan yang menembus coating. Nilai dari tiap komponen tersebut terdapat di Tabel 2.



Gambar 6. Rangkaian listrik ekuivalen LCS Blanko (a); dan coating nitrocarburizing variasi temperatur (b)

Berdasarkan Tabel 2, semakin tinggi rapat arus PEO yang diterapkan, semakin tinggi resistansi polarisasinya. Nilai C_{ct} dan C_{coat} pada coating nitrocarburizing variasi temperatur nilainya semakin berkurang ketika temperature nitrocarburizing bertambah, yang artinya impedansi kapasitif lapisan luar dan dalam semakin baik, karena 1/X_c = jω.

Efek Nitrocarburizing Pada Material Low Carbon Steel Terhadap Ketahanan Korosi dan Kekerasan (Fajar Al Afghani, Erwan Hermawan, Siti Shaleha)

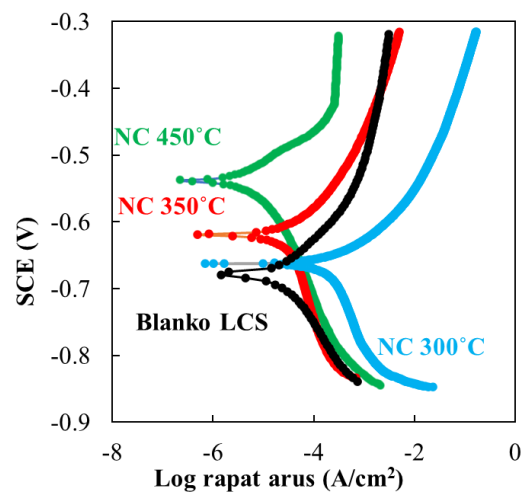
Tabel 2. Parameter fitting rangkaian ekuivalen LCS Blanko dan nitrocarburizing variasi temperatur

Parameter	LCS Blanko	Temperatur Nitrocarburizing (°C)		
		300	350	450
RS (Ω.cm ⁻²)	4,5 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻³	5,5 x 10 ⁻³	5,4 x 10 ⁻³
R _{ct} (Ω.cm ⁻²)	671	673	746	798
C _{ct} (S*s ^a .cm ⁻²)	1,2 x 10 ⁻³	0,5 x 10 ⁻³	0,5 x 10 ⁻³	0,2 x 10 ⁻³
R _{coat} (Ω.cm ⁻²)	-	835	973	2057
C _{coat} (S*s ^a .cm ⁻²)	-	1,1 x 10 ⁻⁵	5,3 x 10 ⁻⁶	0,2 x 10 ⁻⁶
a _{ct}	0,7	0,7	0,7	0,7
a _{coating}	-	0,9	0,7	0,9
Goodness of fit (χ ²)	0,2 x 10 ⁻³	0,5 x 10 ⁻³	0,7 x 10 ⁻³	2,1 x 10 ⁻³

d. Hasil Pengujian Potensiodinamik

Karakteristik laju korosi coating nitrocarburizing dievaluasi dengan uji Potentiodynamic Polarization (PDP). Gambar 7 menunjukkan kurva PDP coating nitrocarburizing variasi temperatur. Nilai potensial korosi dan arus korosi ditampilkan di Tabel 3. Dapat dilihat bahwa kurva PDP dari coating nitrocarburizing semakin tergeser ke nilai arus dan potensial yang lebih rendah ketika temperatur nitrocarburizing semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan korosi LCS meningkat, karena dipengaruhi oleh ketebalan yang meningkat ketika temperatur nitrocarburizing bertambah dan pori-pori yang persentasenya semakin berkurang. Persentase pori yang sedikit tersebut mencegah ion korosif berpenetrasi kedalam substrat. Nilai rapat arus korosi sampel tercoating semakin kecil/negatif hingga mencapai 6,03 x 10⁻⁶ A.cm⁻² untuk coating nitrocarburizing 450 °C, yaitu 1 orde di bawah nilai rapat arus korosi blanko LCS. Selain itu, kurva PDP dari coating nitrocarburizing semakin tergeser ke atas ketika temperatur nitrocarburizing semakin besar. Nilai E_{corr} yang semakin positif menunjukkan ketahanan korosi yang lebih baik. Kandungan Fe di dalam coating berperan menggeser potensial korosi ke arah negatif.

Fe memiliki potensial yang rendah yaitu -0,44 sampai -0,610 V terhadap standard hydrogen electrode (SHE)[24] sehingga ketika coating terpapar larutan korosif maka Na di dalam coating akan terkorosi terlebih dahulu secara selektif. Penurunan nilai potensial korosi coating nitrocarburizing yang ditumbuhkan telah dilaporkan sebelumnya [12], [13].



Gambar 7. Kurva potensiodinamik polarizations LCS substrat dan coating nitrocarburizing variasi temperatur dalam larutan 0,1 M HCl.

Tabel 3. Parameter hasil uji potensiodinamik LCS sebelum dan sesudah nitrocarburizing

Parameter	Blanko	Low carbon steel Nitrocarburizing (NC)		
		NC 300°C	NC 350°C	NC 450°C
Beta A (V/decade)	0,10	0,09	0,09	0,07
Beta C (V/decade)	0,28	0,33	0,11	0,16
i _{corr} (µA/cm ²)	32,7	16,5	7,49	6,03
E _{corr} (mV)	-599	-642	-659	-518
CR (mpy)	18,78	13,9	6,862	2,657
Chi square	6,677	10,5	3,615	4,843

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, nilai kekerasan diperoleh dengan melakukan pengerasan pada permukaan LCS. Peningkatan temperatur pada proses nitrocarburizing dengan menggunakan temperatur 300 – 450 °C menghasilkan spesimen yang lebih keras. Kekerasan yang diperoleh 131% hingga 313% dari nilai kekerasan awal. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, peningkatan temperatur pada kisaran 350 – 450 °C hanya memberikan peningkatan nilai kekerasan 22% karena menggunakan argon pada proses nitrocarburizing. Ketahanan korosi meningkat seiring dengan peningkatan temperatur nitrocarburizing. Peningkatan ketahanan korosi dipengaruhi oleh sifat lapisan Fe₃N yang lebih kapasitif sehingga membrikan nilai impedansi yang besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Kepala Pusat Riset Teknologi Akselerator yang telah memfasilitasi penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami ucapkan kepada staf uji radiometalurgi yang telah membantu dalam penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] OECD Steel Commitee Meeting, "Steel Demand Outlook 2021- 2022," Brussels, 2021.
- [2] S. Illescas, J. Fernández, J. Asensio, M. Sánchez-Soto, and J. M. Guilemany, "Study of the mechanical properties of low carbon content HSLA steels," *Rev. Metal.*, vol. 45, no. 6, pp. 424–431, 2009, doi: 10.3989/revmetalm.0902.
- [3] P. Podany and M. Balcar, "Properties of low carbon steel with various microalloying additions after particular thermomechanical processing," *Mater. Sci. Technol. Conf. Exhib. 2011, MS T'11*, vol. 1, pp. 735–742, 2011.
- [4] W. Chen *et al.*, "The thermal process for hardening the nitrocarburized layers of a low-carbon steel," *Scr. Mater.*, vol. 210, p. 114467, 2022, doi: 10.1016/j.scriptamat.2021.114467.
- [5] M. A. J. Somers, "Nitriding and nitrocarburizing: Status and future challenges," *Proc. Heat Treat. Surf. Eng. HTSE 2013*, pp. 69–84, 2013.
- [6] G. Chen, J. Wang, H. Fan, D. Wang, X. Li, and H. Dong, "Combat molten aluminum corrosion of AISI H13 steel by low-temperature liquid nitrocarburizing," *J. Alloys Compd.*, vol. 776, pp. 702–711, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.10.298.
- [7] H. Zhao, L. Duan, G. Chen, H. Fan, J. Wang, and C. Zhou, "High corrosion resistance performance of 304 stainless steel after liquid nitrocarburization," *Compos. Part B Eng.*, vol. 155, pp. 173–177, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.07.062.
- [8] P. Cisquini, S. V. Ramos, P. R. P. Viana, V. D. F. C. Lins, A. R. Franco, and E. A. Vieira, "Effect of the roughness produced by plasma nitrocarburizing on corrosion resistance of AISI 304 austenitic stainless steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 1897–1906, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.01.006.
- [9] J. Alphonsa, V. S. Raja, and S. Mukherjee, "Study of plasma nitriding and nitrocarburizing for higher corrosion resistance and hardness of 2205 duplex stainless steel," *Corros. Sci.*, vol. 100, pp. 121–132, 2015, doi: 10.1016/j.corsci.2015.07.014.
- [10] E. Boztepe, A. C. Alves, E. Ariza, L. A. Rocha, N. Cansever, and F. Toptan, "A comparative investigation of the corrosion and tribocorrosion behaviour of nitrocarburized, gas nitrided, fluidized-bed nitrided, and plasma nitrided plastic mould steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 334, pp. 116–123, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.033.
- [11] S. Sriyono *et al.*, "the Debris particles analysis of RSG-GAS coolant to anticipate sediment induced corrosion," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 18, no. 1, p. 11, 2016, doi: 10.17146/jpen.2016.18.1.2675.
- [12] S. Chotijah, "Studi surface hardening pada bahan roda gigi buatan Indonesia dengan menggunakan DC-plasma nitrocarburizing," *Risal. Fis.*, vol. 1, no. 2, pp. 53–58, 2017, doi: 10.35895/rf.v1i2.72.
- [13] E. Hermawan, U. Sudjadi, and M. K. Ajiriyanto, "Effect of nitrocarburizing and argon admixing on low carbon steel for component facility in

- radiometallurgical installation,” vol. 31, no. 4, pp. 1–7, 2021, doi: 10.14456/jmmm.2021.xx.
- [14] G. Liu, J. Liu, J. Zhang, M. Zhang, and Y. Feng, “Microstructure evolution and mechanical properties of medium carbon martensitic steel during warm rolling and annealing process,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 22, 2021, doi: 10.3390/ma14226900.
- [15] A. H. Kandil, A. A. F. Waheed, and H. M. T. Tawfik, “Water chemistry effect on corrosion of nuclear fuel cladding material zircaloy-4 (Zr-4),” *Int J Adv Res*, vol. 2, no. 4, pp. 149–162, 2014.
- [16] M. Naeem *et al.*, “The effect of argon admixing on nitriding of plain carbon steel in N₂ and N₂-H₂ plasma,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 350, pp. 48–56, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.07.004.
- [17] P. G. Reyes, C. Torres, and H. Martínez, “Electron temperature and ion density measurements in a glow discharge of an Ar-N₂ mixture,” *Radiat. Eff. Defects Solids*, vol. 169, no. 4, pp. 285–292, 2014, doi: 10.1080/10420150.2013.860975.
- [18] T. Borowski, “Enhancing the corrosion resistance of austenitic steel using active screen plasma nitriding and nitrocarburising,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 12, 2021, doi: 10.3390/ma14123320.
- [19] S. Y. Lu, K. F. Yao, Y. B. Chen, M. H. Wang, Y. Shao, and X. Y. Ge, “Effects of austenitizing temperature on the microstructure and electrochemical behavior of a martensitic stainless steel,” *J. Appl. Electrochem.*, vol. 45, no. 4, pp. 375–383, 2015, doi: 10.1007/s10800-015-0796-1.
- [20] S. S. Deshpande, P. P. Deshpande, and M. J. Rathod, “Effect of gas nitrocarburizing post oxidation on electrochemical behaviour of AISI 4140 steel in neutral medium,” *Mater. Today Proc.*, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.332.
- [21] A. S. Azar, A. Lekatou, M. F. Sunding, J. S. Graff, N. Tzima, and S. Diplas, “Corrosion performance and degradation mechanism of a bi-metallic aluminum structure processed by wire-arc additive manufacturing,” *npj Mater. Degrad.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1038/s41529-021-00175-4.
- [22] K. Abbas, R. Ahmad, I. A. Khan, S. Saleem, and U. Ikhlaiq, “Influence of argon gas concentration in N₂-Ar plasma for the nitridation of Si in abnormal glow discharge,” *Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng.*, 2016.
- [23] L. Jiang, H. Luo, and C. Zhao, “Nitrocarburising of AISI 316 stainless steel at low temperature,” *Surf. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 205–210, 2018, doi: 10.1080/02670844.2016.1253268.
- [24] M. H. Yusoff *et al.*, “An Electrochemical evaluation of synthesized coumarin-azo dyes as potential corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl medium,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 15, pp. 11742–11756, 2020, doi: 10.20964/2020.12.43.

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG